

УДК 66.017

Я.С. Кузин¹, И.А. Козлов¹, С.В. Сибилева¹, М.А. Фомина¹

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОМПОНЕНТНОГО СОСТАВА ЭЛЕКТРОЛИТОВ ПЭО НА ИХ СТАБИЛЬНОСТЬ И СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ

DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-11-102-112

Проведены исследования работоспособности различных вариантов компонентного состава щелочных электролитов плазменного электролитического оксидирования (ПЭО). В качестве компонентов водных растворов использовались техническое жидкое стекло, NaOH, Na₂B₄O₇, Na₃PO₄, NaAlO₂. Все компоненты исследуемых электролитов являются наиболее распространенными для применения в процессах ПЭО алюминиевых сплавов. Проведена оценка влияния компонентного состава электролитов на их стабильность в течение 30 сут экспозиции, по результатам которой выбраны наиболее стабильные составы. Проведены исследования структуры и свойств покрытий, формируемых на образцах из алюминиевого сплава АК6 в процессе ПЭО. Установлены зависимости твердости покрытий и их скорости роста от состава электролита. Предложены возможные варианты роста покрытий в процессе ПЭО при различном компонентном составе электролитов.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, плазменное электролитическое оксидирование, стабильность электролита, свойства ПЭО-покрытия.

Ya.S. Kuzin¹, I.A. Kozlov¹, S.V. Sibileva¹, M.A. Fomina¹

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF COMPONENT COMPOSITION OF PEO ELECTROLYTES ON THEIR STABILITY AND COATING PROPERTIES

The efficiency of various variants of the component composition of alkaline electrolytes of plasma electrolytic oxidation (PEO) was studied. Technical liquid glass, NaOH, Na₂B₄O₇, Na₃PO₄, and NaAlO₂ were used as components of aqueous solutions. All of the studied components of electrolytes are the most common for use in PEO processes of aluminum alloys. The influence of the component composition of electrolytes on their stability during 30 days of exposure was evaluated, and the most stable compositions were selected. The structure and properties of coatings formed on samples of aluminum alloy AK6 during PEO are studied. The dependences of the hardness of coatings and their growth rate on the composition of the electrolyte are established. Possible variants of coating growth in the PEO process with different component composition of electrolytes are proposed.

Keywords: aluminum alloys, plasma electrolytic oxidation, electrolyte stability, PEO properties.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Повышению весовой эффективности конструкций летательных аппаратов в современной авиационной технике уделено большое внимание [1]. Наряду с выбором оптимальных конструкторских решений ведутся работы и по повышению прочностных

и весовых свойств алюминиевых сплавов. В течение всего прошлого века и до настоящего времени актуальными являются работы по совершенствованию химического состава [2–4], технологии выплавки [5–7], деформации [8–10], термической [11–12], химической и электрохимической обработок [13–15] алюминиевых сплавов как основного конструкционного материала.

Одновременно с современными технологиями изготовления сплавов на основе алюминия развиваются и технологии их антикоррозионной защиты неметаллическими неорганическими покрытиями и обработки поверхности [16–19]. В настоящее время в мировой практике представлено чрезвычайно большое количество вариантов химических и электрохимических технологий нанесения покрытий. Особенно актуальным для алюминия и его сплавов является формирование на поверхности плазменных электролитических оксидированных (ПЭО) покрытий с целью повышения износостойкости поверхности [20–22]. Формируемые в процессе плазменного электролитического оксидирования высокотемпературные фазы, такие как $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$, могут существенно повысить механические свойства поверхности [23]. Отличительной чертой технологии нанесения ПЭО-покрытий от остальных электрохимических процессов является низкое содержание солей в используемых электролитах [24–26].

Технология плазменного электролитического оксидирования является довольно вариативной, что обусловлено широкими возможностями токовых режимов и возможностью реализации микроплазменного искрения практически на всех металлических материалах, даже на стали [27–31]. Однако практические вопросы применения данной технологии затрагиваются в открытой печати незначительно. Крайне мало известно также о работоспособности электролитов в течение времени, что немаловажно при промышленном освоении технологии.

На основании вышеизложенного исследование влияния компонентного состава электролитов ПЭО на их стабильность и свойства покрытий является актуальной задачей, а полученные результаты позволят расширить внедрение технологии плазменного электролитического оксидирования на предприятиях отрасли.

Работа выполнена в рамках реализации комплексной научной проблемы 17.1. «Экологически безопасные, плазменные электролитические покрытия для легких сплавов».

Материалы и методы

Исследования проводили на образцах деформируемого алюминиевого сплава АК6, изготовленных из прутка диаметром 60 мм (для каждого варианта использовали по 5 и более образцов). Содержание основных легирующих элементов в сплаве АК6 следующее, % (по массе):

Al	Cu	Si	Mg	Mn
Основа	1,8–2,6	0,7–1,2	0,4–0,8	0,4–0,8

Подготовка поверхности образцов перед нанесением ПЭО-покрытия заключалась в травлении образцов в растворе щелочи при температуре 50–55 °С с последующим снятием шлама в растворе азотной кислоты при температуре 20–25 °С.

Формирование ПЭО-покрытия на поверхности образцов из алюминиевого сплава АК6 осуществляли в водном растворе электролитов, состав которых приведен в таблице. В качестве ванн для нанесения покрытий использовали емкости из поливинилхлорида, оборудованные системой поддержания постоянной температуры электролита.

Состав электролитов для плазменного электролитического оксидирования
алюминиевого сплава

Условный номер электролита	Количество компонента в электролите, г/л				
	ТЖС*	NaOH	Na ₂ B ₄ O ₇	Na ₃ PO ₄	NaAlO ₂
1	10	10	–	–	–
2	10	10	5	–	–
3	10	10	–	5	–
4	10	10	–	–	5
5	–	10	10	–	–
6	–	10	–	10	–
7	–	10	–	–	10
8	10	–	10	–	–
9	10	–	–	10	–
10	10	–	–	–	10

* Техническое жидкое стекло.

Значения pH различных электролитов измеряли с использованием pH-метра S400 Seven Excellence производства фирмы Mettler-Toledo International. При измерениях использовали твердотельный электрод InLab Expert, обеспечивающий точность 0,01 единицы pH в диапазоне от 0,1 до 14 pH. Температуру электролитов поддерживали постоянной. На каждый вариант приходилось не менее 3 измерений с последующим расчетом среднего значения.

Выдержку приготовленных электролитов проводили в непрозрачной полиэтиленовой таре с неплотно закрытой крышкой, что обеспечивало взаимодействие воздуха с электролитами. Емкости с электролитами хранили в лабораторных условиях при постоянной температуре, варьирующейся от 20 до 24 °С, и относительной влажности воздуха в пределах 30–40%.

В качестве источника тока использовали установку плазменного электролитического оксидирования MicroArc 3.0 производства ООО НПФ «ИНСИТЕК», обеспечивающую амплитуду катодного и анодного поляризующих импульсов до 600 В. Значения плотности тока, длительности импульсов, соотношений амплитуд анодного и катодного импульсов тока для всех исследуемых вариантов оставались неизменными.

Для определения толщины формируемых ПЭО-покрытий использовали толщиномер MiniTest 2100 и датчик N02, работающий по методу вихревых токов. Перед каждой серией измерений прибор калибровали на необходимый диапазон толщины. Проводили не менее 5 измерений толщины покрытия на различных участках поверхности образца, после чего фиксировали среднее значение толщины покрытия и среднее отклонение от него.

Исследования структуры ПЭО-покрытия проводили методом электронной сканирующей микроскопии с помощью сканирующего микроскопа в режиме эмиссии вторичных (SEI) и обратноотраженных (BEC или COMPO) электронов. Для исследований использовали поперечные шлифы образцов из алюминиевого сплава с ПЭО-покрытием. Для каждого из таких образцов количество областей исследования выбирали индивидуально, исходя из его толщины, но так, чтобы количество областей сканирования составляло не менее 5, но не более 15. Размеры областей сканирования выбирали таким образом, чтобы минимальная площадь каждой области была в диаметре не менее 3 мкм.

Микротвердость покрытия измеряли по методу Виккерса на приборе Emcotest Durascan на поперечном шлифе путем определения величины отпечатка индентора,

внедряемого при заданной и постоянной нагрузке 0,0981 Н в течение 15 с. В качестве индентора применяли четырехгранную алмазную пирамидку с углом при вершине, равным 136 градусов. Количество точек измерения составляло не менее 5 на каждый образец. Значения твердости вычисляли в соответствии с ГОСТ Р ИСО 6507-1–2007 путем деления нагрузки F на квадрат среднеарифметического значения диагонали отпечатка:

$$HV=0,189F/d^2,$$

где F – нагрузка на индентор, Н; d – среднеарифметическое значение длин диагоналей $d1$ и $d2$ отпечатка пирамидки на исследуемом объекте, мм.

Результаты и обсуждение

С учетом анализа научно-технической информации и на основании имеющегося научно-технического задела для исследований выбраны и приготовлены образцы составов электролитов (см. таблицу), являющихся наиболее перспективными для формирования ПЭО-покрытий на поверхности образцов из алюминиевого сплава АК6. Следует отметить, что большинство электролитов имели в качестве основного компонента техническое натриевое жидкое стекло. Очередность введения компонентов оставалась одинаковой для всех исследуемых вариантов. Первым вводили техническое жидкое стекло, затем едкий натр и далее остальные компоненты. При отсутствии в составе технического жидкого стекла первым растворяли едкий натр, затем остальные компоненты.

Основным критерием получения стабильных результатов при реализации плазменного электролитического оксидирования является стабильность химического состава электролита. Для оценки стабильности состава проведены исследования pH растворов, а также визуальное наблюдение внешнего вида растворов в течение 30 сут. Установлено, что электролиты 1–3 и 5–9 полностью прозрачные, все компоненты растворяются полностью. Электролиты 4 и 10 при смешивании имели мутный белый цвет, их внешний вид представлен на рис. 1.

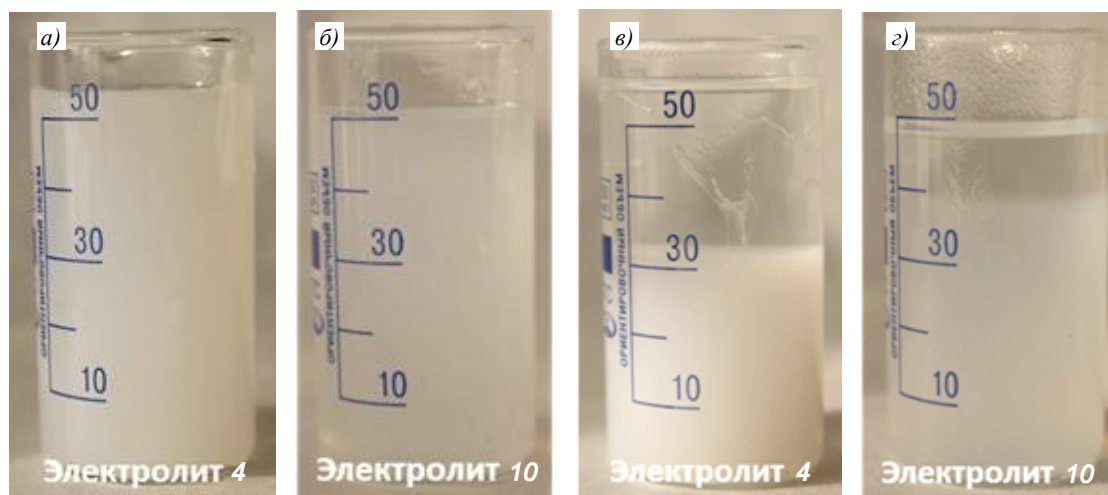
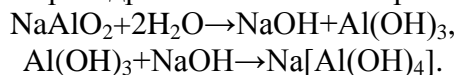


Рис. 1. Внешний вид электролитов 4 и 10 до (а, б) и после выдержки (в, г)

На основании полученных данных предположили, что алюминат натрия в щелочной среде образует тетрагидроксоалюминат натрия



Полученные во время выдержки результаты измерений значения кислотности электролитов представлены на рис. 2. Установлено, что изменение рН электролитов с течением времени минимальное, а введение натрия тетраборнокислого в электролит без технического жидкого стекла приводит к меньшему защелачиванию раствора. При этом если в растворе присутствует жидкое стекло, рН существенно возрастает и достигает значений >13 . Следует отметить, что при выбранных концентрациях жидкого стекла и едкого натра все варианты растворов, имеющих данные компоненты в своем составе, обладают значением рН, превышающим или близким к 13.

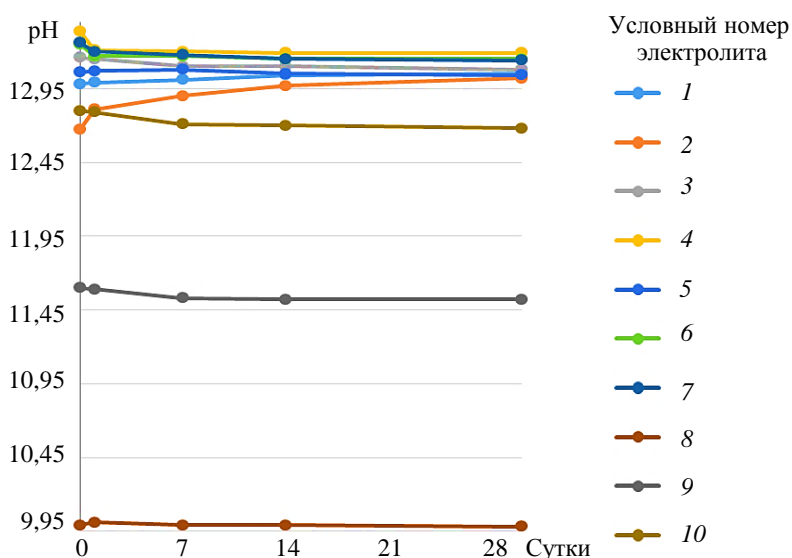


Рис. 2. Изменение рН электролитов при выдержке в течение 30 сут

При использовании натрия тетраборнокислого наблюдается незначительное возрастание показателя рН с 12,67 до 13,02 в водном растворе, содержащем щелочь и жидкое стекло, т. е. введение натрия тетраборнокислого не влияет на рН.

Во всех рассматриваемых вариантах при введении алюмината натрия в первоначальный момент времени рН раствора существенно больше, чем после выдержки. Данный результат косвенно подтверждает предположение о взаимодействии ионов алюминия с компонентами раствора, что приводит к образованию труднорастворимых солей и, как следствие, к потере стабильности.

Использование тринатрийфосфата аналогично применению алюмината – натрия повышает рН растворов, однако эти изменения не столь существенны. Одновременно с этим следует отметить, что тринатрийфосфат может выступать в качестве стабилизатора соединений кремния в щелочной среде.

Работоспособность полученных электролитов до и после длительной выдержки определяли путем реализации процесса плазменного электролитического оксидирования с последующим визуальным контролем поверхности образцов из алюминиевых сплавов, при наличии покрытия производился анализ его свойств (толщина, твердость).

По результатам визуального контроля процесса плазменного электролитического оксидирования выявлено, что в электролитах 1–3, 8 и 9, как после приготовления, так и после длительной выдержки, процесс нанесения протекает равномерно, без резких скачков напряжения. Зажигание микроплазменных разрядов на поверхности образцов происходит практически сразу после наложения поляризирующего напряжения. На протяжении всего времени оксидирования наблюдалось стабильное горение

микроплазменных разрядов. Визуальный контроль поверхности образцов по окончании оксидирования показал, что ПЭО-покрытие имеет равномерный серый цвет, без явных дефектов в виде протравленной поверхности или непокрытых участков, что указывает на работоспособность данных электролитов.

В электролитах 4–7 процесс плазменного электролитического оксидирования протекает нестабильно или вовсе не происходит зажигания микроплазменных разрядов. Искрение на поверхности прекращается спустя 10–20 мин после наложения поляризирующего напряжения, что не позволяет сформировать покрытие необходимой толщины. По результатам визуального контроля поверхности образцов после оксидирования установлено, что поверхность имеет металлический цвет, без признаков наличия ПЭО-покрытия. Внешний вид образцов представлен на рис. 3. Можно предположить, что формирования покрытия на поверхности образцов не происходит из-за высокого травящего эффекта электролита, а также из-за отсутствия соединений кремния, способствующих образованию матрицы ПЭО-покрытия. На основании этого установлено, что данные электролиты не могут быть использованы в данной работе.

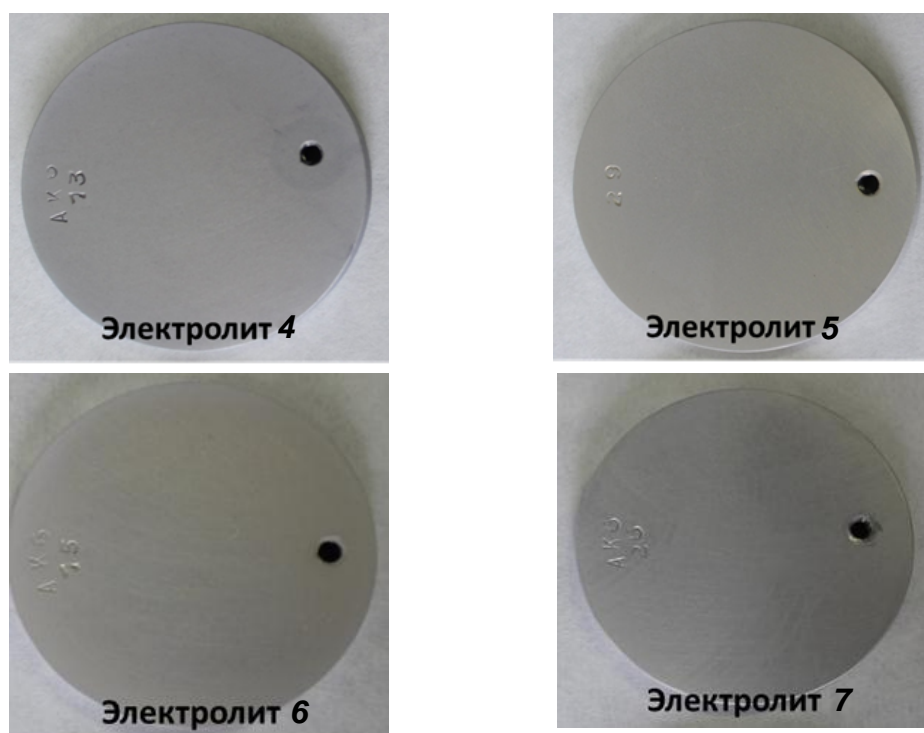
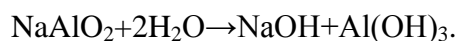


Рис. 3. Внешний вид образцов из сплава АК6 после обработки с помощью плазменного электролитического оксидирования в электролитах, выдержанных в течение 30 сут

В процессе оксидирования образца в электролите 10 установлено, что покрытие сформировалось только при применении вновь приготовленного раствора. При осуществлении длительной выдержки в электролите образовывался осадок и формирования покрытия не происходило. По окончании оксидирования на поверхности образца формируется гелеобразная масса, препятствующая образованию покрытия (рис. 4).

Эффект образования на поверхности образца гелеобразной массы предположительно связан с насыщением электролита гидроксидом алюминия за счет длительного взаимодействия с водой:



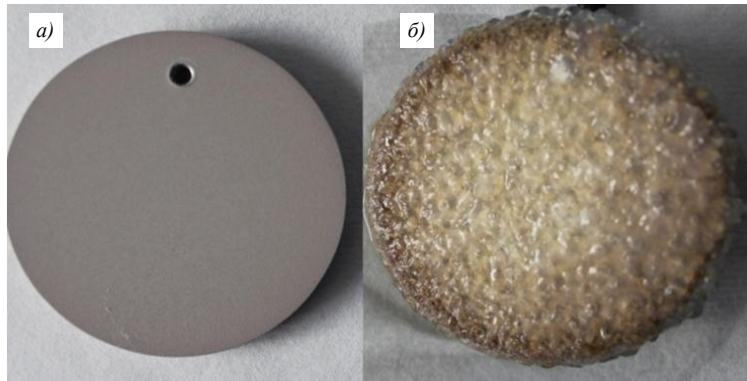
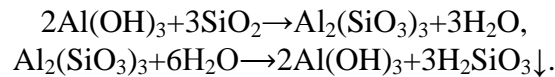


Рис. 4. Внешний вид образца с покрытием после обработки в электролите 10:
a – вновь приготовленный электролит; *б* – электролит после выдержки в течение 30 сут

Последующая реализация процесса плазменного электролитического оксидирования приводит к локальному разогреву приповерхностной зоны у алюминиевого образца, что, возможно, связано с образованием соединений алюминия и кремния и их осаждению на обрабатываемую поверхность в виде гелеобразной массы:



Далее проведен анализ свойств покрытий, полученных на образцах составов электролитов 1–3, 8 и 9. Установлено, что максимальная микротвердость ПЭО-покрытия на сплаве АК6 достигается при использовании электролита 9 и составляет 1031 HV. Одновременно с этим следует отметить благоприятное воздействие введения в силикатно-щелочной электролит боратов и фосфатов. Микротвердость ПЭО-покрытия увеличивается с 544 до 700 HV (рис. 5).

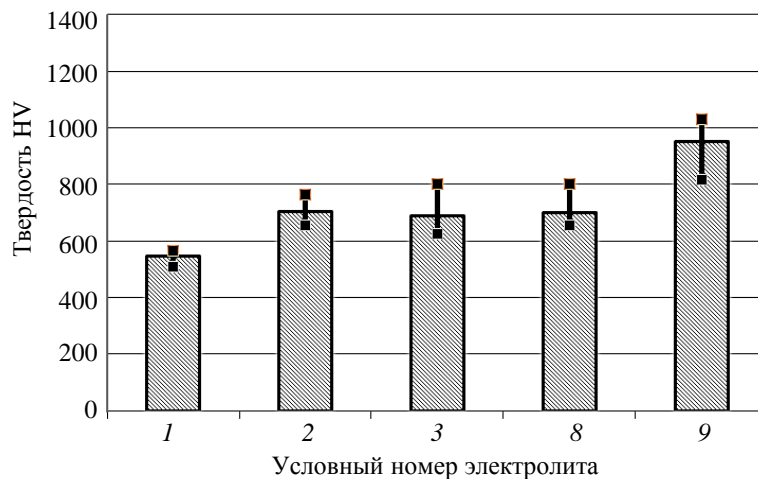


Рис. 5. Микротвердость ПЭО-покрытия, сформированного в различных электролитах после выдержки в течение 30 сут

Одновременно с этим проведен анализ толщины ПЭО-покрытия. Установлено, что максимальная толщина и скорость роста покрытия наблюдаются при использовании электролитов 8 и 9. Введение боратов в состав силикатного электролита увеличивает скорость роста ПЭО-покрытия, а введение фосфатов, наоборот, снижает. Данный факт предположительно связан с изменением pH растворов. Чем больше данный

показатель, тем интенсивнее происходят процессы травления, что также подтверждается сравнением толщин покрытий, полученных в электролитах с едким натром и без него (рис. 6).

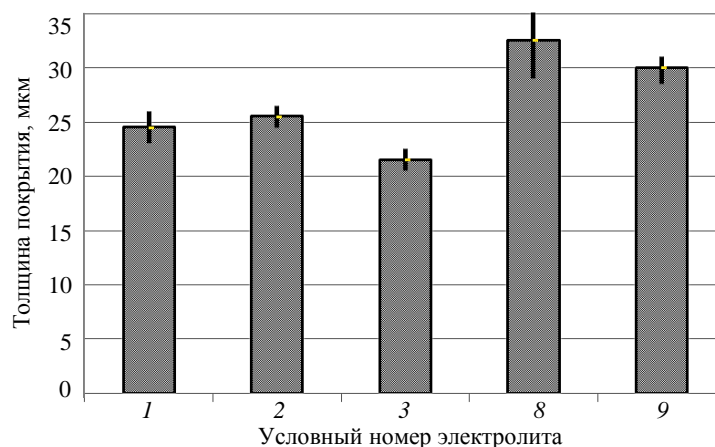


Рис. 6. Толщина ПЭО-покрытия, сформированного в различных электролитах после выдержки в течение 30 сут

Исследования структуры ПЭО-покрытия показали, что наибольшей сквозной пористостью обладает покрытие, сформированное в электролите 1. Одновременно с этим следует отметить, что практически на всех образцах наблюдается послойное строение покрытия. Верхний слой имеет меньшее количество дефектов и в зависимости от состава электролита его вклад в общую толщину покрытия различный. Наименьшее соотношение толщины внешнего слоя к общей толщине наблюдается у покрытий, сформированных в электролитах 8 и 9, максимальное – у покрытий, сформированных в электролитах 1 и 3.

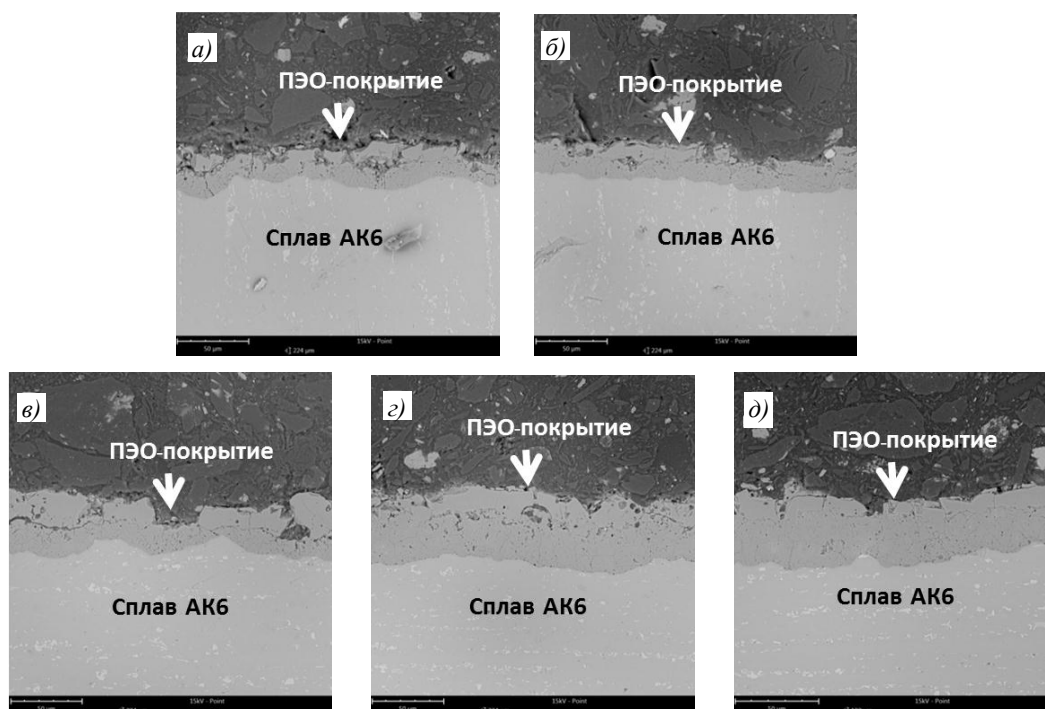


Рис. 7. Поперечные шлифы ПЭО-покрытий, сформированных в различных электролитах

При анализе структуры внутреннего слоя ПЭО-покрытия установлено, что наименьшее количество дефектов наблюдается при использовании электролитов 8 и 9, а наибольшее – при использовании электролитов 1 и 2. Дефекты имеют форму трещин и в большинстве случаев располагаются вертикально, имея начало практически у границы раздела «металл–покрытие». Другой вид дефектов не выходит на поверхность – это внутренние поры, имеющие форму сферы или эллипса. В покрытиях, сформированных в электролитах 1–3, также присутствуют протяженные внутренние дефекты на границе раздела слоев покрытий – внутреннего и внешнего (рис. 7).

Заключения

Проведенные исследования показали, что добавки типа алюмината натрия в электролиты, содержащие техническое жидкое стекло, существенно снижают стабильность системы и не обеспечивают формирование покрытия с высоким уровнем свойств.

Высокое содержание солей натрия и, возможно, других щелочноземельных металлов приводит к снижению скорости роста ПЭО-покрытия на алюминиевом сплаве АК6 из-за высокой травящей способности электролита.

Введение в состав силикатного электролита соли фосфорной кислоты обеспечивает получение комплексных соединений, позволяющих стабилизировать ионы кремния в щелочной среде и тем самым повысить устойчивость системы в течение длительного времени хранения.

Введение в состав силикатного электролита натрия тетраборнокислого позволяет увеличить количество ионов в объеме электролита и повысить скорость роста покрытия. Одновременно с этим рН электролита имеет наиболее низкое значение, что снижает травящую способность и благоприятно сказывается на структуре ПЭО-покрытия.

По результатам исследований наиболее предпочтительными для плазменного электролитического оксидирования сплава АК6 можно считать растворы электролитов, включающие техническое жидкое стекло, тринатрийфосфат и/или натрий тетраборнокислый, при этом значение рН электролита должно быть в интервале значений от 9 до 12. С целью достижения высоких свойств ПЭО-покрытия необходима оптимизация концентраций компонентов.

Библиографический список

1. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Ключкова Ю.Ю. Алюминий-литиевые сплавы нового поколения и слоистые алюмопластики на их основе // Цветные металлы. 2016. №8. С. 86–91.
2. Каблов Е.Н., Лукина Е.А., Сбитнева С.В. и др. Формирование метастабильных фаз при распаде твердого раствора в процессе искусственного старения Al-сплавов // Технология легких сплавов. 2016. №3. С. 7–17.
3. Han L.N., Sui Y.D., Wang Q.D. et al. Effects of Nd on microstructure and mechanical properties of cast Al–Si–Cu–Ni–Mg piston alloys // Alloys Compound. 2017. No. 695. P. 1566–1572.
4. Ключков Г.Г., Грушко О.Е., Ключкова Ю.Ю., Романенко В.А. Промышленное освоение высокопрочного сплава В-1469 системы Al–Cu–Li–Mg // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2014. №7. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 26.08.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-7-1-1.
5. Li S., He C., Fu J., Xu J., Wang Z. Evolution of microstructure and properties of novel aluminum-lithium alloy with different roll casting process parameters during twin-roll casting // Materials Characterization. 2020. Vol. 161. Art. 110145. DOI: 10.1016/j.matchar.2020.110145.
6. Han J., Wang J., Zhang M., Niu K. Susceptibility of lithium containing aluminum alloys to cracking during solidification // Materialia. 2019. Vol. 5. Art. 100203. DOI: 10.1016/j.mtla.2018.100203.

7. Meriç C. Physical and mechanical properties of cast under vacuum aluminum alloy 2024 containing lithium additions // *Materials Research Bulletin*. 2000. Vol. 35. Issue 9. P. 1479–1494.
8. Ghosh A., Adesola A., Szpunar J.A. et al. Effect of tempering conditions on dynamic deformation behaviour of an aluminium-lithium alloy // *Materials & Design*. 2015. Vol. 81. P. 1–10.
9. Nayan N., Gurao N.P., Narayana Murty S.V.S. et al. Microstructure and micro-texture evolution during large strain deformation of an aluminium-copper-lithium alloy AA2195 // *Materials & Design*. 2015. Vol. 65. P. 862–868.
10. Odeshi A.G., Tihamiyu A.A., Das D. et al. High strain-rate deformation of T8-tempered, cryo-rolled and ultrafine grained AA 2099 aluminum alloy // *Materials Science and Engineering: A*. 2019. Vol. 754. P. 602–612.
11. Yang H.L., Ji S.X., Fan Z.Y. Effect of heat treatment and Fe content on the microstructure and mechanical properties of die-cast Al–Si–Cu alloys // *Materials & Design*. 2015. No. 85. P. 823–832.
12. Лукин В.И., Иода Е.Н., Пантелеев М.Д., Скупов А.А. Влияние термической обработки на характеристики сварных соединений высокопрочных алюминийлитиевых сплавов // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* 2015. №4. Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 26.08.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-4-6-6.
13. Yoganandan G., Balaraju J.N., Low C.H.C. et al. Electrochemical and long term corrosion behavior of Mn and Mo oxyanions sealed anodic oxide surface developed on aerospace aluminum alloy (AA2024) // *Surface & Coatings Technology*. 2016. No. 288. P. 115–125.
14. Антипов В.В., Чесноков Д.В., Козлов И.А., Волков И.А., Петрова А.П. Подготовка поверхности алюминиевого сплава В-1469 перед применением в составе слоистого гибридного материала // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* 2018. №4 (64). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 26.08.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-4-59-65.
15. Ma Y., Zhou X., Liao Y. et al. Effect of anodizing parameters on film morphology and corrosion resistance of AA2099 // *Journal of The Electrochemical Society*. 2016. No. 163 (7). P. 369–376.
16. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Сенаторова О.Г. Слоистые алюмокомпозиты СИАЛ-1441 и сотрудничество с AIRBUS и TU DELFT // *Цветные металлы*. 2013. №9. С. 50–53.
17. Павловская Т.Г., Волков И.А., Козлов И.А., Наприенко С.А. Экологически улучшенная технология обработки поверхности алюминиевых сплавов // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* 2016. №7 (43). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 26.08.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-7-2-2.
18. Способ получения покрытия на алюминиевых сплавах: пат. 2547983 Рос. Федерация. №2014114615/02; заявл. 14.04.14; опубл. 10.04.15; Бюл. №10.
19. Дуюнова В.А., Козлов И.А., Оглодков М.С., Козлова А.А. Современные тенденции анодного оксидирования алюминий-литиевых и алюминиевых сплавов (обзор) // *Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн.* 2019. №8 (80). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 27.08.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-8-79-89.
20. Суминов И.В., Эпельфельд А.В., Людин В.Б. и др. Микродуговое оксидирование (теория, технология, оборудование). М.: ЭКОМЕТ, 2005. 368 с.
21. Суминов И.В., Белкин П.Н., Эпельфельд А.В. и др. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов: в 2 т. / под ред. И.В. Суминова. М.: Техносфера, 2011. Т. 2. 512 с.
22. Ракоч А.Г., Бардин И.В. Микродуговое оксидирование легких сплавов // *Металлург*. 2010. №6. С. 58–61.
23. Марков Г.А., Терлеева О.П., Шулепко Е.К. Повышение износостойкости деталей газонфтяного оборудования за счет реализации эффекта избирательного переноса и создания износостойких покрытий // *Микродуговые и дуговые методы нанесения защитных покрытий: сб. науч. тр. / Моск. ин-т нефтехимической и газовой пром-сти им. И.М. Губкина. М., 1985. Вып. 185. С. 54–64.*
24. Jovović J., Stojadinović S., Šišović N.M., Konjević N. Spectroscopic characterization of plasma during electrolytic oxidation (PEO) of aluminium // *Surface and Coatings Technology*. 2011. Vol. 206. P. 24–28.

25. Parfenov E.V., Yerokhin A., Nevyantseva R.R., Gorbatkov M.V. Towards smart electrolytic plasma technologies: An overview of methodological approaches to process modelling // *Surface and Coatings Technology*. 2015. Vol. 269. P. 2–22.
26. Hussein R.O., Northwood D.O., Nie X. Coating growth behavior during the plasma electrolytic oxidation process // *Journal of Vacuum Science and Technology A: Vacuum, Surfaces and Films*. 2010. No. 28. P. 766–773.
27. Гнеденков С.В., Хрисанфова О.А., Синебрюхов С.Л., Пузь А.В. Композиционные защитные покрытия на поверхности стали // *Коррозия: материалы, защита*. 2007. №11. С. 27–33.
28. Гнеденков С.В., Хрисанфова О.А., Синебрюхов С.Л. и др. Композиционные защитные покрытия на поверхности никелида титана // *Коррозия: материалы, защита*. 2007. №2. С. 20–25.
29. Гнеденков С.В., Хрисанфова О.А., Завидная А.Г. и др. Силикатные защитные покрытия на стали // *Коррозия: материалы, защита*. 2009. №11. С. 26–32.
30. Kim G.W., Kim Y.S., Shin D.H. et al. Influence of ZrO₂ incorporation into coating layer on electrochemical response of low-carbon steel processed by electrochemical plasma coating // *Surface and Coatings Technology*. 2015. Vol. 269. No. 1. P. 314–318.
31. Минаев А.Н., Гнеденков А.С., Гнеденков С.В. и др. Многофункциональные защитные покрытия для судового энергетического оборудования // *Морские интеллектуальные технологии*. 2013. №S1. С. 49–55.